

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aluminium 6061 merupakan salah satu material paduan aluminium yang banyak digunakan dalam industri manufaktur cetakan karena memiliki kombinasi sifat mekanis yang menguntungkan, dimana memiliki kekuatan tarik sekitar 125 MPa, kekerasan Brinnel 30 HB, densitas rendah 2,7 g/cm³, dan proses pemesinan yang sangat baik. Balonji Dkk. Dalam penelitiannya memprediksi kekasaran permukaan pada pemesinan blok Al 6061, dan menemukan bahwa kecepatan *spindel*, kedalaman potong aksial, kedalaman potong radial, serta *feedrate* memiliki korelasi signifikan terhadap kekasaran permukaan yang dihasilkan (Balonji dkk., 2023). Sementara itu, Zaidi Dkk. menemukan bahwa optimasi parameter pemesinan melalui *Taguchi-Grey Relational Analysis* dapat menghasilkan perbaikan *surface finish* hingga 21,69% dengan pengurangan konsumsi energi spesifik sebesar 11,39% (Zaidi dkk., 2024). Penelitian-penelitian ini mengonfirmasi bahwa aluminium 6061 memiliki proses pemesinan yang baik, didorong oleh proses optimasi untuk mencapai kualitas permukaan yang optimal dalam pembuatan cetakan.

Kualitas permukaan menjadi salah satu indikator utama dalam proses pemesinan *Computer Numerical Control* (CNC), khususnya pada tahap *finishing*, yang menentukan hasil akhir produk. Lai Dkk. Menegaskan bahwa kualitas permukaan yang tinggi menjadi indikator yang penting dalam pemesinan dengan kinerja tinggi, di mana kekasaran permukaan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh parameter pemotongan dan vibrasi pemesinan (Lai dkk., 2024). Dalam industri pembuatan cetakan (*mold making*), kekasaran permukaan yang dihasilkan pada tahap *finishing* CNC *milling* merupakan salah satu indikator kualitas proses pemesinan yang penting. Tingkat kekasaran yang lebih rendah mengindikasikan distribusi *scallop height* yang lebih seragam dan kualitas lintasan pahat yang lebih baik. Selain kekasaran permukaan, waktu pemesinan merupakan indikator langsung dari efisiensi produksi yang menentukan kapasitas produksi cetakan secara keseluruhan. Umumnya, tingkat kekasaran yang dihasilkan mesin CNC *milling* pada *surface finish* berada dalam rentang Ra 0,8–6,3 µm. Material sebagian besar

adalah baja dan aluminium. Pencapaian nilai R_a dapat lebih rendah dengan perencanaan penggunaan *toolpath* yang tepat diikuti oleh parameter pemotongan yang sistematis. (Grešová dkk., 2022). Mencatat bahwa pada proses *surface finish* dapat memakan 70-80% waktu produksi yang dibutuhkan dalam pembuatan cetakan, sehingga pemilihan strategi *toolpath* yang tepat menjadi indikator krusial dari segi perspektif kualitas maupun efisiensi.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh strategi *toolpath* terhadap kualitas permukaan pada CNC *milling*, namun penelitian sebagian besar berfokus pada perbandingan strategi-strategi konvensional. Varga Dkk. Membandingkan strategi *Constant Z*, *Spiral*, dan *Spiral Circle* pada pemesinan permukaan berbentuk (*shaped surface*) aluminium AlCu4Mg dan menemukan variasi signifikan pada topografi permukaan dan nilai kekasaran antarstrategi (Varga dkk., 2023). Gresova Dkk. Membandingkan strategi *linear*, *offset*, dan *spiral* pada *freeform milling* 3-axis dan 5-axis, di mana strategi *spiral* dan *offset* menunjukkan deviasi permukaan yang lebih rendah (Grešová dkk., 2022). Jayakumar Dkk. Meneliti hubungan antara jarak *pitch toolpath trochoidal* terhadap kekasaran permukaan dan melaporkan bahwa tipe trajektori *toolpath* lebih kritis terhadap kualitas permukaan dibandingkan parameter teknis alat potong semata (Jayakumar dkk., 2024). Namun, studi komparatif yang secara spesifik membahas 2 strategi *finishing toolpath* secara bersamaan masih jarang ditemukan, terutama pada aplikasi pembuatan cetakan aluminium 6061. Strategi 3D *scallop* bekerja dengan prinsip menjaga ketinggian *scallop* yang konstan pada seluruh permukaan, sehingga menghasilkan distribusi kekasaran yang merata pada permukaan meskipun jarak lintasan bervariasi. Pendekatan *constant scallop height* telah diteliti oleh Soori Dkk. menunjukan bahwa optimasi parameter pemesinan dengan metode Taguchi untuk mencapai *scallop height* yang seragam mampu menurunkan kekasaran permukaan sebesar 23,8% pada permukaan *freeform* (Soori dkk., 2024). Pembuatan cetakan masih sangat terbatas, sebagian penelitian tidak membahas kekasaran permukaan dengan efisiensi waktu produksi secara bersamaan.

Adapun urgensi penelitian ini diperkuat dengan adanya fakta dalam industri manufaktur cetakan moderen, keputusan pemilihan strategi *finishing toolpath* seringkali didasari oleh pengalaman operator atau rekomendasi bawaan *software*

Computer Aided Manufacturing (CAM) tanpa landasan data komparatif yang memadai. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa penentuan strategi *finishing toolpath* yang tepat harus mempertimbangkan keseimbangan dari 2 aspek utama proses pemesinan. Pertama, kekasaran permukaan menjadi indikator utama kualitas cetakan. Kedua waktu pemesinan adalah representasi efisiensi waktu produksi.

Berdasarkan latar belakang permasalahan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan pengaruh strategi *finishing toolpath* mana terhadap tingkat kekasaran dan efisiensi waktu produksi pada proses CNC *milling* dalam pembuatan cetakan aluminium 6061.

1.2 Fokus Penelitian

Adapun fokus penelitian dalam analisis perbandingan strategi *finishing toolpath* sebagai berikut:

1. Membandingkan dua strategi *finishing toolpath* meliputi 3D *scallop*, dan *Morphed Spiral* dalam membuat rongga atau kontur cetakan pada proses CNC *milling*.
2. Mengetahui waktu proses pemesinan CNC *milling* pada kedua strategi *finishing toolpath*, baik yang tercatat pada *display* mesin CNC maupun yang diestimasi oleh *software* CAM.
3. Mengetahui perbedaan strategi *finishing toolpath* terhadap tingkat kekasaran permukaan (R_a) berdasarkan analisis mikroskop optik menggunakan *software* Gwyddion.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan spesimen uji aluminium 6061 permasalahan utama yang perlu diteliti lebih dalam sebagai berikut:

1. Bagaimana perbedaan strategi *finishing toolpath* 3D *Scallop* dan *Morphed Spiral* terhadap tingkat kekasaran permukaan (R_a) berdasarkan analisis mikroskop optik menggunakan *software* Gwyddion pada proses CNC *milling*?
2. Bagaimana perbedaan strategi *finishing toolpath* 3D *Scallop* dan *Morphed Spiral* terhadap efisiensi waktu produksi pada proses CNC *milling* cetakan, baik berdasarkan waktu aktual pada *display* mesin CNC maupun estimasi *software* CAM?

3. Strategi *finishing toolpath* manakah yang memberikan hasil paling optimal antara kualitas kekasaran permukaan dan efisiensi waktu produksi pada pembuatan cetakan?

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian dalam analisis perbandingan strategi *finishing toolpath* dengan spesimen uji aluminium 6061 ini adalah:

1. Menganalisis perbedaan strategi *finishing toolpath* (3D *Scallop* dan *Morphed Spiral*) terhadap tingkat kekasaran permukaan (R_a) pada proses CNC *milling* cetakan aluminium 6061.
2. Menganalisis pengaruh strategi *finishing toolpath* (3D *Scallop* dan *Morphed Spiral*) terhadap efisiensi waktu produksi pada proses CNC *milling* cetakan aluminium 6061, dengan membandingkan data waktu aktual dari *display* mesin CNC dan data estimasi dari *software* CAM.
3. Menentukan strategi *finishing toolpath* yang paling optimal berdasarkan keseimbangan antara kualitas kekasaran permukaan dan efisiensi waktu produksi dalam pembuatan cetakan aluminium 6061.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari analisis perbandingan strategi *finishing toolpath* adalah sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi data empiris mengenai perbandingan dua strategi *finishing toolpath* (3D *Scallop* dan *Morphed Spiral*) yang masih terbatas dalam literatur ilmiah, khususnya pada material aluminium 6061 untuk aplikasi pembuatan cetakan.
2. Menjadi referensi akademik dan dasar pengembangan riset lebih lanjut di bidang optimasi proses *finishing* CNC *milling*, terutama terkait hubungan antara strategi *toolpath* dengan kekasaran permukaan dan efisiensi waktu produksi, termasuk akurasi estimasi waktu pemesinan pada *software* CAM
3. Memberikan rekomendasi berbasis data bagi operator dan programmer CNC dalam menentukan strategi *finishing toolpath* yang optimal sesuai dengan prioritas produksi, baik mengutamakan kualitas permukaan maupun efisiensi waktu.

1.6 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap terarah dan dapat mencapai hasil yang valid, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Strategi *finishing toolpath* yang diteliti terbatas pada dua jenis, yaitu 3D *Scallop* dan *Morphed Spiral*.
2. Parameter pemotongan (kecepatan *spindel*, *feedrate*, dan kedalaman potong) ditetapkan secara konstan pada seluruh eksperimen untuk mengisolasi variabel strategi *toolpath*.
3. Variabel respons yang diukur terbatas pada tingkat kekasaran permukaan (R_a) dan waktu pemesinan pada tahap *finishing*

